

SUPERCONDUCTIVE CONNECTION METHOD OF SUPERCONDUCTIVE WIRES AND SUPERCONDUCTIVE CONNECTION STRUCTURE

Patent Number: JP2001102105
Publication date: 2001-04-13
Inventor(s): HASE TAKASHI; MURAKAMI YUKINOBU; TOMONAGA MITSUO
Applicant(s):: KOBE STEEL LTD
Requested Patent: ☐ JP2001102105 (JP01102105)
Application Number: JP19990279998 19990930
Priority Number(s):
IPC Classification: H01R4/02 ; H01F6/06 ; H01F6/00 ; H01R4/68 ; H01R43/02
EC Classification: .
Equivalents:

Abstract

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a method of superconductive-connecting superconductive wires that secures a practical superconductive current even in a magnetic field of about 0.5T, enabling a magnet of a superconductive film of an oxide to be driven in the permanent current mode, and the magnet.

SOLUTION: The connection method comprises the steps of preparing a primary molten metal or alloy except Pb alloyed with Ag having an alloyed melting point not exceeding 500 deg.C or Pb alloyed with Ag having a Pb content of 20 weight % or less and an alloyed melting point not exceeding 500 deg.C, dipping the end portion of the connecting wire in the primary molten metal or alloy to melt its sheath material composed of Ag or its alloy separated from the superconductive filament group of an oxide, alloying the metal, alloy or Pb alloy constituting the primary molten alloy with a Pb or its alloy to prepare a secondary molten alloy having a Pb content of 20 weight % or more and an alloyed melting point not exceeding 500 deg.C and showing superconduction property when being solidified, dipping the end portion of the connecting wire, and solidifying the secondary molten alloy to make a superconductive connection of the connecting wire.

Data supplied from the esp@cenet database - I2

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号
特開2001-102105
(P2001-102105A)

(43)公開日 平成13年4月13日 (2001. 4. 13)

(51)Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テームト [*] (参考)
H 0 1 R 4/02		H 0 1 R 4/02	Z 5 E 0 8 5
H 0 1 F 6/06	Z A A	4/68	
6/00	Z A A	43/02	Z
H 0 1 R 4/68		H 0 1 F 5/08	Z A A E
43/02			Z A A N

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 8 頁) 最終頁に続く

(21)出願番号 特願平11-279998

(22)出願日 平成11年9月30日 (1999. 9. 30)

(71)出願人 000001199

株式会社神戸製鋼所

兵庫県神戸市中央区脇浜町1丁目3番18号

(72)発明者 長谷 隆司

神戸市西区高塚台1丁目5番5号 株式会
社神戸製鋼所神戸総合技術研究所内

(72)発明者 村上 幸伸

神戸市西区高塚台1丁目5番5号 株式会
社神戸製鋼所神戸総合技術研究所内

(74)代理人 100067828

弁理士 小谷 悦司 (外1名)

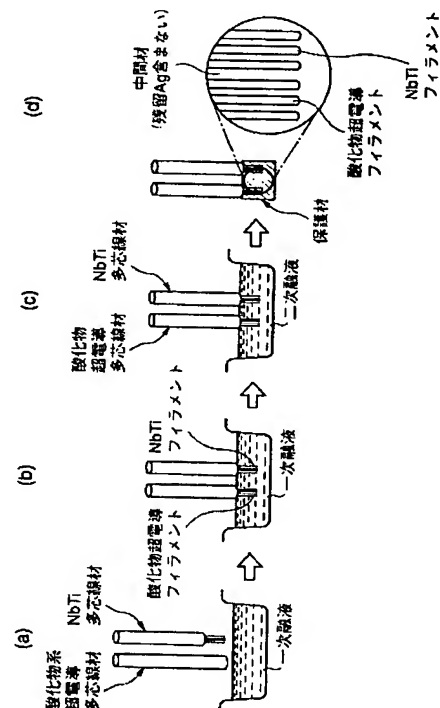
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 超電導線材の超電導接続方法および超電導接続構造

(57)【要約】 (修正有)

【課題】 0. 5 T程度の磁場中でも実用超電導電流を流せ、酸化物系超電導マグネットの永久電流モードで運転が可能な超電導線材の超電導接続方法、接続構造超電導マグネット。

【解決手段】 一次融液としてA gとの合金の融点が500℃以下のP b以外の金属若しくは合金、又はP b含有量が20質量%未満で且つA gとの合金の融点が500℃以下のP b合金を加熱した融液を用い、一次融液に被接続線材の端部を浸漬して端部のA g又はA g合金から成るシース材を溶融して酸化物超電導フィラメント群から分離し、次いで、二次融液としてP b含有量が20質量%以上で且つ一次融液を構成する金属若しくは合金又はP b合金と合金の形成時の融点が500℃以下であり、その融液を凝固時に超電導特性を示すP b合金又はP bを加熱した融液を用い、一次融液に浸漬した被接続線材の端部を二次融液に浸漬した後、二次融液を固化・凝固させ被接続線材を超電導接続する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 酸化物系超電導線材と金属系超電導線材、または酸化物系超電導線材同士を超電導接続するに当たり、一次融液としてA gとの合金の融点が500℃以下であるP b以外の金属若しくは合金、またはP b含有量が20質量%未満で且つA gとの合金の融点が500℃以下となるP b合金を加熱した融液を用い、該一次融液に被接続線材の端部を浸漬して該端部のA gまたはA g合金から成るシース材を溶融して酸化物超電導フィラメント群から分離し、次いで、二次融液としてP b含有量が20質量%以上で且つ前記一次融液を構成する金属若しくは合金またはP b合金と合金を形成したときの融点が500℃以下であり、その融液を凝固した場合に超電導特性を示すP b合金またはP bを加熱した融液を用い、前記一次融液に浸漬した被接続線材の端部を前記二次融液に浸漬した後、該二次融液を固化・凝固させることによって被接続線材を超電導接続することを特徴とする超電導接続方法。

【請求項2】 請求項1に記載の各浸漬工程を2回以上実施する請求項1に記載の超電導接続方法。

【請求項3】 前記一次融液を構成するP b以外の金属または合金が、Hg、In、Sn、BiおよびGaよりなる群から選択される1種または2種以上の元素を含む金属または合金である請求項1または2に記載の超電導接続方法。

【請求項4】 前記二次融液を構成するP b合金が、Hg、In、Sn、BiおよびGaよりなる群から選択される1種または2種以上の元素を含むものである請求項1～3のいずれかに記載の超電導接続方法。

【請求項5】 超電導接続された部分が、A gの含有量が0.1質量%以下のP b合金からなるものであることを特徴とする超電導接続構造。

【請求項6】 請求項5の超電導接続構造とそれに接続される超電導コイルを構成要素として含む超電導マグネット。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、酸化物系超電導線材と金属系超電導線材、または酸化物系超電導線材同士を超電導接続する方法、および超電導接続構造、並びにその超電導接続構造を構成要素として含む超電導マグネット等に関するものであり、特に高分解能核磁気共鳴(NMR)分析装置に用いられる超電導マグネットの素材として、酸化物系超電導線材を適用する際に有用な超電導接続方法および超電導接続構造並びにその超電導接続構造を有する超電導マグネット等に関するものである。

【0002】

【従来の技術】近年、電気抵抗がゼロで大電流を流すことができる超電導線材を用いることで、大電流送電や強

磁場発生装置等の利用が広がりつつある。特に高分解能NMR分析装置に用いられる超電導マグネットは、大電流通電による強磁場発生と抵抗ゼロを利用して電源を用いない永久電流モードの運転を行うものであり、超電導現象を利用することで初めて実現可能な応用の典型である。

【0003】従来、超電導マグネットの素材となる超電導線材としては、NbTi、Nb₃Sn、Nb₃Al等の金属系超電導線材が用いられており、これらの金属系超電導線材は、磁気共鳴イメージング医療診断装置、高分解能NMR装置等のように、極度に時間的に安定な磁場が要求される各種機器に応用されてきた。これらの場合、前述の特徴を有効に活用するには、装置に用いられる超電導線材同士を超電導状態を維持しつつ接続することによって、ループ状に永久的に電流が流れ続ける、いわゆる永久電流モードで動作するように回路が構成されている。

【0004】一方、酸化物系超電導体は、液体ヘリウム温度(4.2K)では金属系超電導体に比べて非常に高い上部臨界磁場を形成するので、これを線材化して超電導マグネットに適用することで、金属系超電導線材では発生させることが困難な23T以上の強磁場を発生する超電導マグネットの実現が期待されている。このように強い磁場を発生させることにより、例えば高分子タンパク質の複雑な分子構造を決定するために非常に重要な役割を担っている高分解能NMR分析装置では、分析情報量が増加し、より詳細な分子構造の決定が可能となり、測定に要する時間も短縮される。

【0005】こうしたことから酸化物系超電導線材を用いてマグネットを構成することも試みられている。この酸化物系超電導マグネットを永久電流モードで動作させるためには、酸化物系超電導線材同士または酸化物系超電導線材と金属系超電導線材を超電導状態を維持しながら接続することが必要である。また、熱または磁場により一時的に超電導状態をON/OFFする永久電流スイッチが必要となる。

【0006】金属系超電導線材においては、超電導接続法および永久電流スイッチが技術的に確立されており、既に実用化されている。例えば、NbTi多芯線材では、線材端部を酸の中に浸漬し、線材を構成する安定化Cuをエッチングによって除去し、NbTiフィラメントを露出させてからフィラメント同士を超電導接続する方法が知られている(例えば、特開昭62-272502号、特開昭63-62110号等)。

【0007】しかしながら、酸化物系超電導線材の場合は、こうした方法は適用できない。即ち、酸化物系超電導線材ではA gまたはA g合金からなるシース材(金属系超電導線材の安定化Cuに相当するもの、以下「A gシース材」で代表することがある)が用いられているが、こうしたA gシースを酸によりエッチングすると、

その内部に埋設された酸化物系超電導フィラメントまでエッチングされてダメージを受けてしまうことになる。

【0008】こうした問題を回避するという観点から、例えば特開平9-134747号には、酸化物系超電導線材フィラメント群の外周側フィラメントの全部または一部が短くなるように山型に成形し、エッチングすることなくフィラメントを露出させる方法が提案されている。しかしながらこうした技術では、フィラメントが露出した部分しか超電導接続に寄与せず、充分な超電導電流を流すことができないという問題があった。

【0009】発明者らも超電導接続についてかねてより研究を進めており、その研究の一環として、酸を用いずフィラメントを露出させ、しかもフィラメント同士が接触する面積を十分に確保できる技術として、特開平9-283253号の技術を提案している。この技術では、超電導特性を示し且つAgとの合金の融点が500℃以下となる金属または合金を加熱して融液とし、その融液に被接続線材の端部を浸漬して該端部のAgまたはAg合金から成るシース材を溶解して酸化物系超電導フィラメント群から分離し、その後その融液を固化・凝固させることによって、超電導線材のフィラメント間を超電導状態を維持した状態で接続する中間材を形成して超電導接続するものである。こうした方法によって、酸化物系超電導線材と金属系超電導線材、または酸化物系超電導体同士の超電導接続が可能となり、ゼロ磁場中では実用レベルの超電導電流を流すことができたのである。

【0010】しかしながらこの方法では、中間材の融液に酸化物系超電導フィラメント群から分離したAgが溶け込むため、その後その融液を固化・凝固させることによって得られる中間材はAgを含んだ合金となり、超電導状態が壊れる磁場である上部臨界磁場が低下するという問題があった。

【0011】一般に、超電導接続部分は、マグネット構造の制約から磁場が1T弱である位置に置かれることが多い。従って、中間材の上部臨界磁場は、1T以上でなければならない。しかしながら、Agを含有した中間材の上部臨界磁場は0.01T程度までに低下するため、通常の位置ではほとんど超電導電流を流すことができないという問題があった。

【0012】

【発明が解決しようとする課題】本発明はこうした状況の下になされたものであって、その目的は、0.5T程度の磁場中でも実用レベルの超電導電流を流すことができると共に、酸化物系超電導マグネットの永久電流モードでの運転を可能にすることのできる様な超電導線材の超電導接続方法、および超電導接続構造並びにその超電導接続構造を有する超電導マグネット等を提供することにある。

【0013】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成し得た本

発明の超電導接続方法とは、酸化物系超電導線材と金属系超電導線材、または酸化物系超電導線材同士を超電導接続するに当たり、一次融液としてAgとの合金の融点が500℃以下であるPb以外の金属若しくは合金、またはPb含有量が20質量%未満で且つAgとの合金の融点が500℃以下となるPb合金を加熱した融液を用い、該一次融液に被接続線材の端部を浸漬して該端部のAgまたはAg合金から成るシース材を溶解して酸化物超電導フィラメント群から分離し、次いで、二次融液としてPb含有量が20質量%以上で且つ前記一次融液を構成する金属若しくは合金またはPb合金と合金を形成したときの融点が500℃以下であり、その融液を凝固した場合に超電導特性を示すPb合金またはPbを加熱した融液を用い、前記一次融液に浸漬した被接続線材の端部を前記二次融液に浸漬した後、該二次融液を固化・凝固させることによって被接続線材を超電導接続する点に要旨を有するものである。

【0014】上記超電導接続方法においては、各浸漬工程を2回以上実施することが好ましい。また前記一次融液を構成するPb以外の金属または合金としては、Hg、In、Sn、BiおよびGaよりなる群から選択される1種または2種以上の元素を含む金属または合金が挙げられ、前記二次融液を構成するPb合金としては、Hg、In、Sn、BiおよびGaよりなる群から選択される1種または2種以上の元素を含むものが挙げられる。

【0015】一方、上記目的を達成することのできた本発明の超電導接続構造とは、超電導接続された部分が、Agの含有量が0.1質量%以下のPb合金からなるものである点に要旨を有するものである。また、この様な超電導接続構造とそれに接続される超電導コイルを構成要素として含むことによって、上記の様な磁場条件中において永久電流モードで運転可能な超電導マグネットが実現できる。

【0016】

【発明の実施の形態】本発明者らは、上記目的を達成する為に様々な角度から検討した。その結果、上記構成を採用すれば上記目的が見事に達成されることを見出し、本発明を完成した。以下、本発明方法における各工程を説明しつつ、本発明の作用について説明する。

【0017】本発明方法では、まず一次融液としてAgとの合金の融点が500℃以下であるPb以外の金属若しくは合金、またはPb含有量が20質量%未満で且つAgとの合金の融点が500℃以下となるPb合金を加熱した融液を用い、該一次融液に被接続線材の端部を浸漬して該端部のAgまたはAg合金から成るシース材を溶解して酸化物超電導フィラメント群から分離するものである。この浸漬工程によって、酸化物超電導フィラメントにダメージを与えずに、被接続線材端部のAgまたはAg合金から成るシース材を溶解することができるの

である。

【0018】上記一次融液にPbが含有されていると、被接続線材の端部を浸漬したときにシース材中に含まれるAgと反応して融液中にPb-Ag-Oが生成し、このPb-Ag-Oは非超電導体であるので、この物質の生成を抑制しない限り、良好な超電導接続の形成は望めない。従って、一次融液としてはPbを含有していないものを基本的に用いるが、本発明者らが検討したところによれば、一次融液中のPb含有量が20質量%未満であれば、上記酸化物の生成を抑制することができることも見出した。こうしたことから、本発明で用いる一次融液としては、Agとの合金の融点が500℃以下であるPb以外の金属若しくは合金、またはPb含有量が20質量%未満で且つAgとの合金の融点が500℃以下となるPb合金のいずれでも良い。

【0019】尚、前記一次融液を構成するPb以外の金属または合金としては、Hg、In、Sn、BiおよびGaよりなる群から選択される1種または2種以上の元素を含む金属または合金が挙げられる。

【0020】Pb-Ag-Oの生成を抑制できても、その際の融液にはシース材を構成していたAgが溶け込んでおり、このまま該融液を固化・凝固させてもその上部臨界磁場は0.2T程度の低い値に留まる。しかし、Pb濃度が20質量%以上で且つ一次融液を構成する金属若しくは合金またはPb合金と合金を形成したときの融点が500℃以下であり、その融液が凝固した場合に超電導特性を示す別のPb合金またはPbを加熱して二次融液とし、その二次融液に酸化物系超電導線材の端部

(前記一次融液に浸漬した端部)を浸漬すれば、二次融液中のPbが酸化物超電導フィラメントの表面に選択的に捕獲され、且つPbが二次融液中の他の元素と合金化することにより、フィラメント近傍にAgが接近することが抑制されるのである。

【0021】そのため、超電導電流が流れる部分(後記中間材)のAg含有量をほとんどゼロ(実質的にAgを含まない)にすることができる。但し、中間材中のAg含有量をほとんどゼロにできても、中間材が純粋なPbでは上部臨界磁場が低く、0.5T程度の磁場中では使用できない。この点本発明では、後記実施例2に示す様に、二次融液の組成としてPb含有量が100質量%のものを用いても、一次融液中に含まれる微量の構成元素とPb合金を形成することによって、こうした不都合も回避される。こうしたことから、本発明で用いる二次融液の組成としてPb含有量が20質量%以上のPb合金またはPbとした。そして、こうした組成の二次融液を用いることによって、中間材としてAgの含有量が0.1質量%以下のPb合金が生成され、この合金は高い上部臨界磁場を有するため、0.5T程度の磁場中でも実用レベルの大きさの超電導電流を流すことが可能な超電導接続構造が実現できたのである。

【0022】尚、前記二次融液を構成するPb合金としては、Hg、In、Sn、BiおよびGaよりなる群から選択される1種または2種以上の元素を含むものが挙げられる。

【0023】本発明方法では、上記浸漬工程を各1回づつ行なうことによって、本発明の効果が発揮されるものであるが、好ましくは各工程を2回以上実施するのが良く、これによって中間材中へのAgの微量混入が抑制され、超電導接続性能をより一層高いものとすることができる。

【0024】以下、本発明を実施例によって更に詳細に説明するが、下記実施例は本発明を限定する性質のものではなく、前・後期の趣旨に徴して設計変形することはいずれも本発明の技術的範囲に含まれるものである。

【0025】

【実施例】比較例(従来例に相当)

図1は、従来方法による超電導接続工程を示す概略説明図である。まず、Bi-2212型と呼ばれる酸化物超電導体($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$)の多芯丸線材を作製し、純酸素1atm中で熱処理を行った。このときの図1(a)、(b)に示す様に、この酸化物系超電導多芯線材と安定化Cuを除去したNbTi多芯線材の各端部を、約350℃に加熱した鉛系ハンダ融液(10質量%Pb-90質量%Ga)に浸漬し、それを2回繰り返した。その後、この鉛系ハンダ融液を冷却して固化・凝固させて中間材(超電導接続された部分)とし、超電導接続構造を形成した[図1(c)]。このとき、その中間材の表面を絶縁テープ(保護材)で被覆した。

【0026】得られた接続部分(中間材)の液体ヘリウム温度(4.2K)における電流-電圧特性を測定し、 $0.1\mu\text{V}/\text{cm}$ 基準における臨界電流(I_c)の磁場依存性を調べたところ、図2の破線で示す結果が得られた。

【0027】この結果から明らかな様に、磁場0Tでは180Aという実用レベルの I_c が得られているが、NMR用マグネット等で接続部分が通常置かれる0.5Tでは超電導電流は流れないことが分かる。

【0028】形成した接続部分を再び350℃に加熱し、酸化物系超電導線材とNbTi線材を超電導状態を維持した状態で接続する中間材である鉛系ハンダの組成を分析したところ、2.5質量%の残留Agが検出された[図1(c)]。この残留Agが、鉛系ハンダの上部臨界磁場を低下させると共に、超電導電流のパスを阻害していると考えられる。

【0029】上記酸化物系超電導線材に耐熱性の被覆絶縁を施した後、ソレノイド巻きにして外径100mm、内径70mm、高さ80mmのコイルを作製し、上記手順に従って永久電流スイッチ付きNbTi多芯線材と超電導接続を形成して、図3に示す様な液体ヘリウム温度(4.2K)における永久電流モード動作の回路を作

製した。尚、図3中、1はコイル用電源、2a, 2bは超電導接続部分、3a, 3bは酸化物系超電導線材、4a, 4bはNbTi多芯線材、5は酸化物系超電導ソレノイドコイル、6は永久電流スイッチ、7は永久電流スイッチ用電源の夫々を示す。そして超電導接続部分は、磁場が0.5Tである位置に設置して、超電導マグネットを構成した。

【0030】上記超電導マグネットにおいて、永久電流モードの運転に移行してからの中心磁場強度の時間依存性を図4の破線に示す。この結果から明らかな様に、0.5T中では接続部分は常電導状態となり電気抵抗を有するため、コイルに捕獲される磁場強度は急激に減衰し、瞬時に0Tとなっていることが分かる。

【0031】また、鉛系ハンダ融液として、X質量% Pb-(100-X)質量% Ga (X \geq 20)を用いた場合には、その融液に酸化物系超電導線材を浸漬したときにAgが溶け始めると同時に非超電導体であるPb-Ag-Oが生成した。これらの場合に得られた試料の接続部分を絶縁テープで保護した後、液体ヘリウム温度

(4.2K)における電流-電圧特性を測定したが、磁場0Tの条件でも超電導電流を流すことができなかった。

【0032】実施例1

図5は、本発明方法による超電導接続工程を示す概略説明図である。図5に示す様に、比較例で作製した酸化物系超電導多芯線材と安定化Cuを除去したNbTi多芯線材の各端部を約350℃に加熱した10質量% Pb-90質量% Gaの一次融液に浸漬し[図5(a)],

(b)、その後やはり約350℃に加熱した90質量% Pb-10質量% Hg (Agを含まない)の二次融液に浸漬して[図5(c)]、この二次融液を固化・凝固させて超電導接続構造を形成した後に、接続部分を絶縁テープ(保護材)で被覆した[図5(d)]。

【0033】得られた接続部分(中間材)の4.2Kにおける電流-電圧特性を測定し、0.1 μ V/cm基準における臨界電流I_cの磁場依存性を調べたところ、前記図2の実線で示す結果が得られた。

【0034】この結果から明らかな様に、前述した比較例の破線に比べて本発明の実線がより上方に位置し、大きく特性が向上していることがわかる。例えば、磁場0.5Tで比較すると、破線の比較例では臨界電流が流れなかったのに対し、実線の実施例1では臨界電流(I_c)が実用レベルの180Aに達しており、また上部臨界磁場は、0.8T以上に向上している。

【0035】形成した接続部分を再び350℃に加熱し、接続部分の中間材を構成していた鉛系ハンダの組成を分析したところ、Agの含有量は0.1質量%以下であった。このように、中間材中のAgの残留量を低く抑えることにより、鉛系ハンダの上部臨界磁場を低下させずに、超電導電流のパスを阻害しない中間材が形成でき

たのである。

【0036】本発明によって完全な超電導接続が達成されていることを実証するために、上記本発明方法によって形成される超電導接続構造法を含んで前記図3に示した様な回路を作製した。このとき、永久電流スイッチ6のNbTi多芯線材4a, 4bと、酸化物系超電導ソレノイドコイル5を形成する酸化物系超電導線材3a, 3bとの超電導接続部分2a, 2bに本発明を適用して、超電導マグネットを構成した。

【0037】上記超電導マグネットにおいて、4.2Kにおける永久電流モードの運転に移行してからの中心磁場強度の時間依存性を図4の実線に示す。図4の破線で示した比較例では、酸化物系超電導コイルに捕獲された磁場の強度は急激に減少したのであるが、実線の実施例では1T以上の磁場を6000分(100時間)以上に亘って捕獲することができおり、優れた特性の永久電流モード動作が実現できた。

【0038】尚、中間材中のAg含有量を低減する目的で、三次融液、四次融液と順次組成の異なる融液に浸漬しても、最終的な融液のPb含有量が20質量%以上で且つその前の融液を構成する純金属または合金との融点が500℃以下であり、その融液を凝固した場合に超電導特性を示す場合は、本発明に包含されるものである。

【0039】実施例2

上記実施例1で用いた二次融液であるPb-Hg合金のPb含有量をパラメータとして、異なる二次融液を用意した。その二次融液を用いて、実施例1と同様にして酸化物系超電導多芯線材とNbTi多芯線材の超電導接続構造を形成し、得られた接続部分の温度が4.2Kでの磁場0.5Tにおける電流-電圧特性を測定して、0.1 μ V/cm基準における臨界電流(I_c)の二次融液のPb含有量依存性を調べた。その結果を図6に示すが、二次融液中のPb含有量が20質量%以上になると、接続部分の臨界電流が急峻に立ち上がり、最高で185Aの臨界電流値が得られていることが分かる。

【0040】一次融液に酸化物系超電導多芯線材とNbTi多芯線材を浸漬して固化・凝固した純金属または合金の量は、二次融液の量に比較して極端に少ないため、中間材の組成は基本的には二次融液の組成と同一になる。しかし、中間材には一次融液の構成元素が微量に含まれることもあり得る。

【0041】前記図6において、二次融液のPb含有量が100質量%の場合にも高い臨界電流(I_c)が得られているのは、一次融液に浸漬した両線材を二次融液に浸漬した際、一次融液の構成元素であるGaが二次融液中に微量(1質量%以下)溶け込み、Pbを合金化するために、それを凝固して得られる中間材の上部臨界磁場が向上するものと考えられる。

【0042】この実施例では、金属系超電導線材としてNbTi線材を用いたが、金属系超電導線材としてその

他のNb₃Sn線材やNb₃Al線材等を用いた場合でも、同様な作用により良好な超電導接続が形成される。

【0043】実施例3

上記実施例1で用いた一次融液に、酸化物系超電導多芯線材と安定化Cuを除去したNbTi多芯線材の各端部を浸漬した後、同一組成の新しい一次融液にもう一度浸漬した。その後、実施例1と同様にして二次融液に両線材の端部を浸漬した後、同一組成の新しい二次融液にもう一度浸漬して凝固させた。即ち、実施例1と比べて、一次融液および二次融液共に浸漬回数を1回ずつ増加した。その結果、中間材中のAgの残留濃度は0.01質量%以下と実施例1よりも1桁低減することができ、温度が4.2Kにおける磁場0.5T中の臨界電流も210Aに達して実施例1の180Aを上回っていた。

【0044】上記実施例では、AgおよびAg合金シース材を溶融させる一次融液の合金として10質量% Pb-90質量% Ga、二次融液として90質量% Pb-10質量% Hgを用いる場合について示した。しかしながら、本発明で用いる一次融液の組成としては、上記の10質量% Pb-90質量% Gaに限らず、Agとの合金の融点が500℃以下でPb含有量が20質量%未満のものであれば、Pb-Ag-Oの生成を抑制することができ、酸化物系超電導フィラメントにダメージを与えることなく、Agシース材を除去することができる。このようなAg合金シースを溶融させる一次融液の金属または合金としては、前述の如くHg、In、Sn、Bi、GaおよびPbよりなる群から選択される1種または2種以上の元素を含む金属または合金が挙げられる。

【0045】また、二次融液の金属または合金としては、Pb-Hgに限らず一次融液の純金属または合金と合金を形成したときの融点が500℃以下であり、その融液を固化・凝固させたときに生成するPb合金中間材が超電導特性を示すような二次融液（但し、Pb含有量が20質量%以上）であれば、酸化物系超電導フィラメントの結晶性を損なわずに超電導接続を行うことができる。このようなPb合金を形成するPb以外の金属としては、超電導接続の部分の性能の良否はあるものの、前述の如くHg、In、Sn、Bi、Gaよりなる群から選択される1種または2種以上の元素を含む金属または合金が挙げられる。

【0046】実施例4

本発明は、Ag（またはAg合金）をシース材とする酸化物系超電導線材ならば、Bi-2212型以外の酸化物系超電導線材、例えばBi-2223型と呼ばれる酸化物超電導体〔(Pb, Bi)₂Sr₂Ca₂Cu₃O₇〕の多芯線材にも適用が可能である。

【0047】厚さ0.3mm、幅3.0mmのAgシースBi-2223テープ多芯線材を作製し、この酸化物系超電導多芯線材と安定化Cuを除去したNbTi多芯線材の各端部を実施例1と同様にして、一次融液（10

質量% Pb-90質量% Ga）、二次融液（90質量% Pb-10質量% Hg）に浸漬して固化・凝固させ、超電導接続構造を形成した。

【0048】この超電導接続構造の接続部分を絶縁テープで保護した後に、接続部分の4.2Kにおける電流-電圧特性を測定し、0.1μV/cm基準における臨界電流（I_c）の磁場依存性を調べたところ、図7の実線で示す結果が得られた。図7の実線の結果を見ると、図2の比較例の破線に比べてより上方に位置し、大きく特性が向上していることがわかる。また磁場0.5Tと比較すると、比較例では臨界電流が流れなかったのに対し、この実施例では臨界電流（I_c）が実用レベルの170Aに達していることが分かる。

【0049】実施例5

本発明は、AgまたはAg合金をシース材とする酸化物系超電導線材同士でも超電導接続を行うことが可能である。前記比較例で作製した酸化物系超電導多芯線材を2本用意し、実施例1と同様にして、両線材の各端部を一次融液（10質量% Pb-90質量% Ga）、二次融液（90質量% Pb-10質量% Hg）に浸漬して固化・凝固させ、超電導接続構造を形成した。

【0050】この超電導接続構造の接続部分を絶縁テープで保護した後に、接続部分の4.2Kにおける電流-電圧特性を測定し、0.1μV/cm基準における臨界電流I_cの磁場依存性を調べたところ、図7の一点鎖線で示す結果が得られた。図7の結果を見ると、図2の比較例の破線に比べてより上方に位置し、大きく特性が向上していることがわかる。磁場0.5Tと比較すると、前記比較例では臨界電流が流れなかったのに対し、この実施例では臨界電流I_cが実用レベルの180Aに達していることが分かる。

【0051】

【発明の効果】本発明は以上の様に構成されており、酸化物系超電導線材と金属系超電導線材または酸化物系超電導線材同士を超電導状態を維持した状態で接続する際に、非超電導体であるPb-Ag-Oの生成を抑制し、且つ中間材中のAg含有量を抑制することが可能となり、0.5T程度の磁場中でも実用レベルの超電導電流を流すことが可能となる。また本発明を適用することによって、NMR分析用の超電導マグネットに代表されるような強磁場で永久電流モード動作が要求される高性能超電導マグネットにおいて、従来の金属系超電導マグネットよりも更に優れた酸化物超電導マグネットの製作が期待でき、その他の永久電流モードを必要とする超電導マグネット応用においても極めて有利となる。

【図面の簡単な説明】

【図1】従来方法による超電導接続工程を示す概略説明図である。

【図2】比較例または実施例1で作製した超電導接続部分の臨界電流の磁場依存性を示すグラフである。

【図3】比較例および実施例1で用いた永久電流モード動作評価用回路の説明図である。

【図4】比較例および実施例1の酸化物系超電導コイルの永久電流モード動作評価結果を示すグラフである。

【図5】本発明方法による超電導接続工程を示す概略説明図である。

【図6】実施例2で作製した超電導接続部分の臨界電流と二次融液中のPb含有量との関係を示すグラフである。

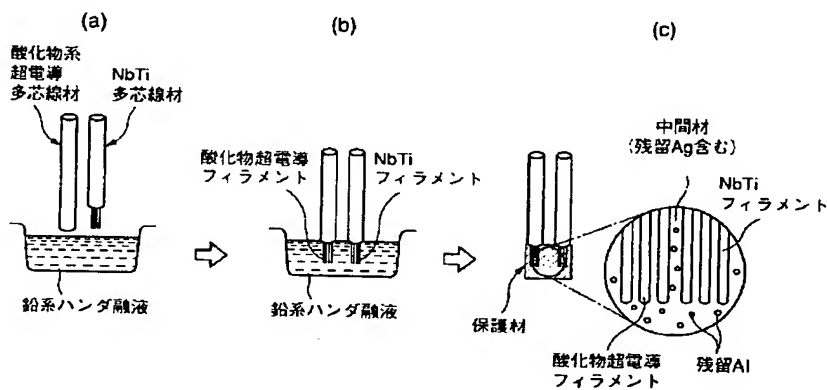
【図7】実施例4および実施例5で作製した超電導接続* 10

* 部分の臨界電流の磁場依存性を示すグラフである。

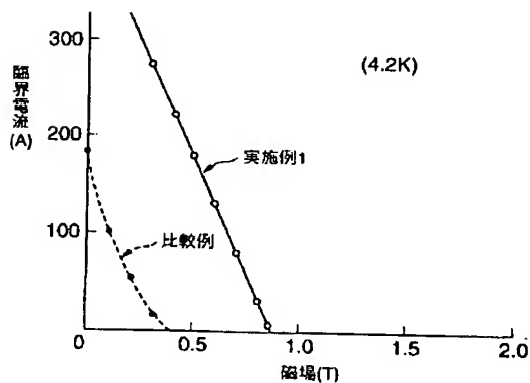
【符号の説明】

- 1 コイル用電源
- 2 a, 2 b 超電導接続部分
- 3 a, 3 b 酸化物系超電導線材
- 4 a, 4 b NiTi多芯線材
- 5 酸化物系超電導ソレノイドコイル
- 6 永久電流スイッチ
- 7 永久電流スイッチ用電源

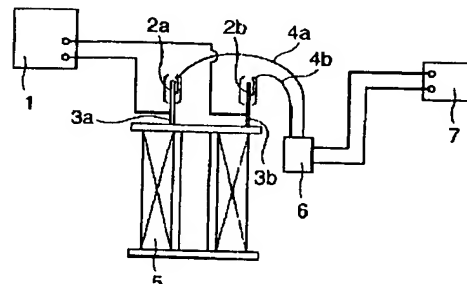
【図1】



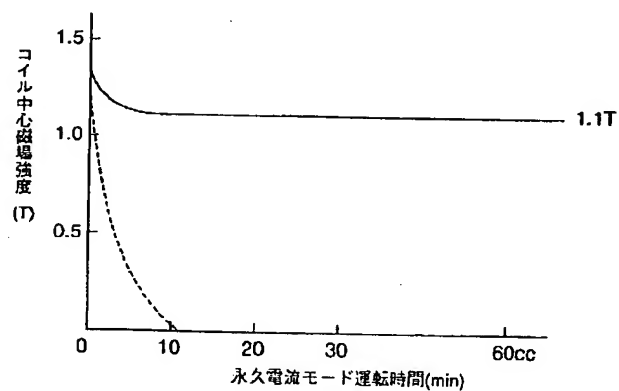
【図2】



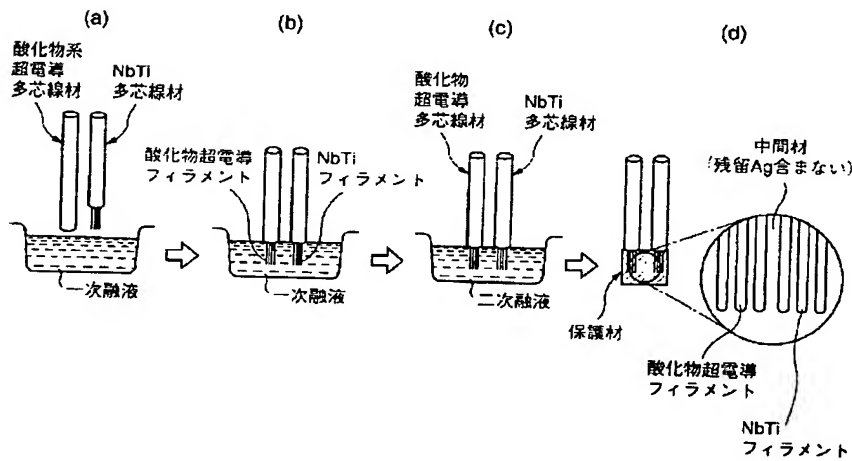
【図3】



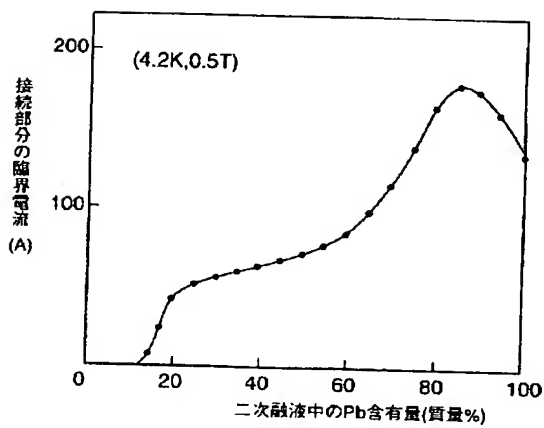
【図4】



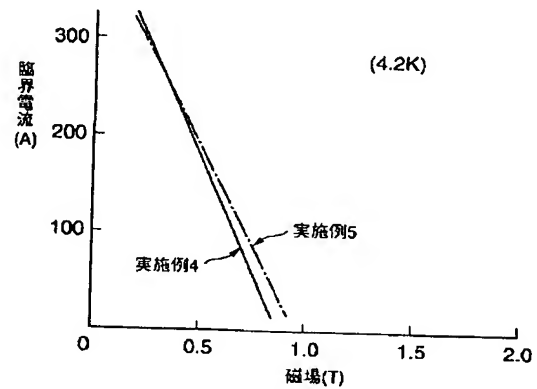
【図5】



【図6】



【図7】



フロントページの続き

(51) Int. Cl.⁷

識別記号

F I

H 0 1 F 7/22

ターマコト (参考)

Z A A J

(72) 発明者 朝永 満男

神戸市西区高塚台1丁目5番5号 株式会
社神戸製鋼所神戸総合技術研究所内

F ターム (参考) 5E085 BB02 CC01 DD01 EE22 EE33
HH01 JJ25 JJ38